

再び地震直前の電離圏電子数上昇について

日置 幸介 [1]; 榎本 祐嗣 [2]
[1] 北大・院理・自然史; [2] 富山県工業技術センター

Preseismic ionospheric electron enhancements, revisited

Kosuke Heki[1]; Yuji Enomoto[2]
[1] Hokkaido Univ.; [2] Toyama Ind. Tech. Cent.

<http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki>

Possible enhancement of ionospheric Total Electron Content (TEC) immediately before the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw9.0) has been reported by Heki [2011]. Critical responses to it often come in two stages; they first doubt the enhancement itself and attribute it to an artifact. Secondly (when they accept the enhancement), they doubt the significance of the enhancement among natural variability of space weather origin. For example, Kamogawa and Kakinami [2013] attributed the enhancement to an artifact falsely detected by the combined effect of the highly variable TEC under active geomagnetic condition and the occurrence of a tsunamigenic ionospheric hole [Kakinami et al., 2012]. Here we closely examine the time series of vertical TEC before and after the 2011 Tohoku-oki earthquake. We first demonstrate that the tsunami did not make an ionospheric hole, and next confirm the reality of the enhancement using data of two other sensors, ionosonde and magnetometers. The amplitude of the preseismic TEC enhancement is within the natural variability, and its snapshot resembles to large-scale traveling ionospheric disturbances (LSTID). However, distinction could be made by examining their propagation properties. Similar TEC anomalies occurred before all the M̥8.5 earthquakes in this century, suggesting their seismic origin.

Figure Caption. (left) Comparison of signals by the three sensors, VTEC by Satellite 15 at the station 3009 (Kashima), E layer critical frequency (foEs) from the ionosonde at Kokubunji, and the geomagnetic field declination at Kakioka, Kanto, relative to Kanoya, Kyushu. The anomalies show up simultaneously ~40 minutes before the 2011 Tohoku-oki earthquake. Reference quadratic curves for VTEC and the declination have been drawn by fitting the data from 3:46 to 7.46 excluding 5:06-6:06. (right) . VTEC residuals from reference polynomials estimated excluding the period between the two broken lines (from -40 to +20 minutes) for the 2011 Tohoku-oki earthquake and three other events, i.e. the 2007 Bengkulu earthquake (M8.5), 2012 North Sumatra earthquake (M8.6), and its largest aftershock (M8.1) that occurred ~2 hours later. Polynomial degrees are 2, 1, 3, 3, 2 from top to bottom. See Cahyadi and Heki [JGR 2013] and Cahyadi and Heki [JGR, in revision] for the detail of the 2007 and 2012 earthquakes. The GPS station names and the satellite numbers are shown to the right. A strong positive anomaly seen in the bottom curve about -1.8 hours is the coseismic ionospheric disturbance of the main shock.

日置 (GRL 2011) は、GPS 観測に基づき、東北沖地震を含む M9 クラスの地震の約 40 分前から電離圏全電子数 (TEC) が上昇することを報告したが、この仮説が研究者間に広く受け入れられたとは言い難い。例えば鴨川・柿並 (JGR 2013) は、津波によって生じる地震後の TEC 急減と、地磁気活動による TEC の非地震性のゆらぎの双方の効果で生じた見かけの変化であると主張している。本発表は日置・榎本 (JGR 投稿中、以下 HE と略称) に沿って、鉛直 TEC と他センサーのデータから鴨川・柿並の主張を再検討し、かつ非地震性と地震性の TEC 変動の判別可能性について論じる。図の説明は英語版参照のこと。

1. 津波は電離圏の穴を作るか？

GPS で観測される斜め TEC には衛星の移動に伴う見かけの変化が含まれ、実際の変化の直観的把握が難しい。本研究では、電子航法研究所が日々公開している受信機と衛星固有の周波数間バイアスと、コードと位相の比較から求めた整数値不確定性を補正の上、F 層への入射角の余弦をかけて求めた VTEC (鉛直 TEC) を議論する。添付の図左は、地震 40 分前から上昇した VTEC が地震後ゆっくり回復する様子を示し、地震十分後の擾乱でいきなり電子の「穴」が形成されるという柿並他 (GRL 2012) の描像と非調和的である。単純なパターン認識だけでなく、地震後の TEC 減少は地震前に始まる上昇からの回復に過ぎないことを HE 論文は数値実験で示した。従って、独立事象としての穴の生成を議論の前提としている鴨川・柿並 (2013) の主張も土台を失う。

2. 他センサーでも見えるか？

GPS 掩蔽で得られた地震直後の青森上空の電子密度高度分布が Astafyeva 他 (GRL 2011) に報告されているが、F 領域の電子密度は IRI-2007 モデルとほぼ一致するものの E 領域のそれはモデルの 3 倍を超える。国分寺のイオノゾンドは foF2 には目立った変化を示さないが、foEs は地震直前に顕著な上昇を示し (Carter 他, JASTP 2013)、TEC 上昇は E 領域が担っていることを示唆する。また TEC の異常が電荷の移動を伴っていれば磁場が変化するだろう。東北および関東の観測局の偏角には地震 40 分前に始まる顕著な変化がみられる。添付図の左は VTEC、柿岡の偏角 (鹿屋基準)、国分寺の foEs が、同期して異常を示していることがわかる。

3. TEC 変化は有意か？

図に示す変化は地磁気活動の活発期における変化としては通常の変動の範囲であり、実際この期間の Dst, Kp, AE 等の指数は激しい変化を示す。たとえ 2011 年東北沖地震が千年に一度の超巨大地震であっても、地震は基本的にリソスフェ

ア中の応力を解放する現象であり、間接的に電離圏に及ぼす影響が宇宙天気による直接的な擾乱を超えるとは思えない。HE 論文では地震前後の同一の衛星 受信局による TEC 変化を数週間にわたって比較し、地磁気活動と TEC の自然な変動幅を議論している。

磁気嵐等の活動に呼応して、TEC 変化に比較的急な変化がしばしば見られる。それらの不規則変化は例外なく北から南へ秒速 300-500 m で移動することから、オーロラ帯から伝搬してきた小振幅の LSTID (大規模移動性擾乱) だろう。一方地震前の変動は震源近傍で地震約 40 分前に一斉に開始しており、移動性を示さない。オーロラ帯起源の TEC の不規則変化と地震前の変化は、伝搬特性から基本的に判別可能だろう。

4. 議論

地震約十分後に生じる電離圏の音波擾乱の振幅は宇宙天気による TEC の自然な変動幅を超えることは稀であるが、その存在を疑う人は少ない。その理由は (1) 発生の時空間パターンが地震との明瞭な相関を示すことと、(2) 物理機構が明らかでないこと、である。地震直前の TEC 上昇は (2) に関しては発展途上だが、(1) に関しては十分な観測事実がある。

日置 (2011) では 2004 スマトラ (M9.2)、2010 マウレ (M8.8)、1994 北海道東方沖 (M8.3) の諸地震で 2011 年東北沖と同様の地震直前 TEC 上昇が見られる事を示したが、論文出版後にデータを入手した 2007 ブンクル (M8.5) 地震 (Cahyadi & Heki, JGR 2013) と、出版後に発生した 2012 年インド洋 (M8.6) 地震 (Cahyadi & Heki, JGR 改訂中) でも TEC は地震の約 40 分前に顕著な上昇の開始を示した (添付図の右)。プラズマバブルによって TEC 変化そのものが観測できなかった 2005 年ニアス地震 (M8.6) を除くと、これらの地震は今世紀に発生した M8.5 以上の巨大地震を網羅する。これらすべてを宇宙天気による偶然と片づけるのは非現実的であり、地震との関連を疑わざるを得ない。

